

Predicción de consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales aislantes

Energy consumption prediction and its relationship with thermal conductivity measurement of insulating materials

Rolando Carvajal¹, José Luis Solís¹, Héctor Vergara¹, Nacarí Marín^{3*}

^{1,2,3} Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: nacari.marin@utp.ac.pa

RESUMEN— Mediciones de temperatura y de análisis de consumo de energía fueron realizados en un recinto del Centro Regional de Azuero de la Universidad Tecnológica de Panamá durante el periodo de un (1) año, para analizar el efecto que produce el utilizar materiales con potencial para aislar térmicamente en el consumo energético. Para este estudio se contemplaron dos materiales comerciales: poliestireno expandido y el gypsum con lámina de aluminio. Para la medida de conductividad térmica se utilizó se un prototipo de medición de conductividad térmica, basado en la norma ASTM-C177 y en la ley de Fourier de transferencia de calor por conducción. La medida de conductividad térmica se realizó también en tres materiales a base de fibras naturales y almidón de yuca: paja de arroz, bagazo de caña y estopa de coco. Con los datos de temperatura, consumo energético y de conductividad térmica obtenidos, se presenta una relación que permite predecir el potencial de aislamiento y consumo de nuevos materiales, considerando en primer lugar a aquellos materiales que se consideran desechos agroindustriales, con el objetivo de darle a estos desechos un valor agregado.

Palabras clave— Aislantes, aprovechamiento de desechos, conductividad térmica, consumo de energía, fibras naturales, temperatura.

ABSTRACT— Temperature measurements and energy consumption analysis were carried out in an enclosure of the Regional Center of Azuero of the Technological University of Panama during the period of one (1) year, to analyze the effect produced by using materials with potential to thermally insulate in energy consumption. Two commercial materials were considered for this study: expanded polystyrene and gypsum with aluminum foil. For the thermal conductivity measurement, a prototype of thermal conductivity measurement was used, based on the ASTM-C177 standard and the Fourier law of conductive heat transfer. The thermal conductivity measurement was also performed on three materials based on natural fibers and cassava starch: rice straw, cane bagasse and coconut bast. With the data of temperature, energy consumption and thermal conductivity obtained, a relationship is presented that allows predicting the potential for insulation and consumption of new materials, considering first those materials that are considered agroindustrial wastes, with the aim of giving This waste an added value.

Keywords— Insulators, waste utilization, thermal conductivity, energy consumption, natural fibers, temperature.

1. Introducción

El consumo energético elevado se debe principalmente al uso de sistemas de acondicionamiento de aire y de refrigeración. Las altas temperaturas promueven un mayor uso de los sistemas de acondicionamiento de aire. En Panamá, informes emitidos por el Banco Mundial, indican que el consumo de energía eléctrica per cápita asciende a 2,064.18 kWh (para el año 2014). Este valor de consumo ubica a Panamá en la posición número uno, siendo el país que más consume energía de la región [1]. Esta situación

justifica la búsqueda de alternativas que incluyen planes de eficiencia energética. Se estima que el consumo de energía en Panamá crece entre 5% y 6% al año. Para el año 2015 se calculó que el 60% del total de la energía que ingresó al sistema nacional fue consumido en acondicionamiento de aire y refrigeración [2], [3]. En el año 2018, se reportó un ascenso en el consumo de 2,291 kWh [4].

Por la naturaleza de las construcciones que se llevan a cabo en Panamá, por medio de las ventanas se transfiere calor por radiación solar. La poca permeabilidad y un

Citación: R. Carvajal, J. Solís, H. Vergara y N. Marín, "Predicción de consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales aislantes", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 5 marzo de 2020. **Recibido con correcciones:** 5 marzo de 2020. **Aceptado:** 11 de enero de 2021.

DOI: 10.33412/iddt.v17.1.2930

Copyright: 2021 R. Carvajal, J. Solís, H. Vergara y N. Marín. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

pobre aislamiento térmico hacen que el consumo de aire acondicionado sea excesivo, debido a la entrada de calor mediante los mecanismos de convección, radiación y conducción [5]. En países del hemisferio norte, el aislamiento apropiado de las edificaciones asegura el bienestar de sus ocupantes durante los meses de invierno. Así mismo, en regiones desérticas, en casas cavadas en la roca (cuevas), el espesor de las paredes juega un papel importante en el aislamiento del recinto [6].

En la península de Azuero, conocido como la región “arco seco” de Panamá, las temperaturas ambientales oscilan entre 28 °C y 33 °C a lo largo del año [7]. Estas altas temperaturas inciden directamente en el consumo eléctrico de la región. Por otra parte, de acuerdo al Informe del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), de la Contraloría General de la República de Panamá para el año 2017/2018 [8], en la península de Azuero se registran 10,960 hectáreas sembradas de arroz y 24,320 hectáreas sembradas de maíz, siendo estos dos rubros los más importantes del país. Del total de hectáreas sembradas, en dicho informe se presenta la cantidad de la producción que se utiliza para la venta, para el consumo del agricultor, consumo animal (en el caso del maíz), para semilla y para otros fines. También se registran pérdidas de 100 hectáreas para el arroz y de 650 hectáreas para el maíz, en las provincias que conforman la península de Azuero. Esta información indica la cantidad potencial que pudiera ser aprovechada como materia prima en la elaboración de materiales naturales para aislamiento térmico. Así como para el caso de los rubros arroz y maíz, se deben considerar otros materiales de desecho y/o pérdida que se generan durante la cosecha y procesamiento de otros rubros y que pueden ser aprovechados para diferentes aplicaciones.

En este artículo se muestra el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas de medida de temperatura exterior e interior, así como los datos de consumo energético obtenidos a partir de un analizador de calidad de energía del salón CE-10, ubicado en el edificio del Centro Experimental de la Universidad Tecnológica de Panamá, sede Azuero, utilizando distintos materiales aislantes y con potencial de aislamiento, que son considerados como desecho agroindustrial. Se presenta una relación de predicción en función de las temperaturas medidas, el coeficiente de conductividad térmica del material empleado como aislante y el consumo

energético del recinto. La reutilización de materiales justifica el estudio desde el punto de vista de búsqueda del valor agregado de materiales que normalmente son considerados como desechos. De aquí la posibilidad de emplearlos como aislantes térmicos. Este trabajo forma parte del trabajo de graduación “Evaluación y análisis térmico y energético de distintos tipos de materiales para aislamiento térmico dentro de un recinto”.

2. Pruebas Experimentales

Pruebas de medición de temperatura y de medición de consumo energético se llevaron a cabo, considerando tres casos: sin aislamiento del recinto, con poliestireno expandido y con gypsum (y lámina de aluminio). Estas pruebas se realizaron de forma simultánea a lo largo de un año, entre los meses de mayo 2018 y mayo 2019, a fin de obtener mediciones de diferentes meses del año y considerando las dos estaciones que se presentan en la Península de Azuero: estación seca y estación lluviosa. Las mediciones de temperatura y de consumo de energía se registraron con y sin aislamiento térmico, para poder contar con información sobre el comportamiento de las mediciones con respecto a las mismas condiciones climáticas, es decir, para la misma época del año. Durante una misma semana se registraron los datos del salón sin aislamiento (lunes y jueves), con poliestireno expandido (martes y miércoles), con gypsum y lámina de aluminio (jueves y viernes). Mensualmente se obtuvieron 8 medidas, lo que da un total de 96 mediciones para cada uno de los tres casos en un año.

La medición de conductividad térmica se realizó en cinco materiales, dos de ellos comerciales (poliestireno expandido, gypsum con lámina de aluminio) y el resto, materiales a base de fibras naturales y almidón de yuca (paja de arroz, bagazo de caña y estopa de coco). La medida de conductividad térmica, permite definir el coeficiente térmico del material y su potencial para aislar.

Con los datos obtenidos a partir de las tres pruebas realizadas se presenta una relación para la predicción del potencial de aislamiento y de consumo de energía de nuevos materiales, considerando en primer lugar a aquellos materiales que se consideran desechos agroindustriales, con el objetivo de darle a estos desechos un valor agregado.



Figura 1. Vista del salón CE-10 modelado con Sketchup V19.0.685

2.1. Medición de temperatura

Las mediciones de temperatura en el exterior e interior del espacio estudiado se realizaron mediante el sistema JRMETER, con base en una plataforma Arduino y sensores de temperatura DHT22 [9]. Este sistema fue presentado en [10], y consiste en un sistema de análisis energético y de temperatura de las ventanas de un aula de clase con y sin aislamiento térmico, con la diferencia del cambio en el tipo de sensor empleado. Para la selección del sensor apropiado, se procedió a programar 3 tipos de sensores de temperatura, específicamente el LM335 [11], DHT11 [12] y DHT22 [9], a través de una conexión sencilla mediante Arduino. Cada sensor midió temperatura durante una hora. Se observó la estabilidad de las mediciones captadas y con un termómetro digital calibrado CIE 305/307, se comprobaron los valores de temperatura obtenidos. En la figura 3 se puede apreciar que las temperaturas medidas por el sensor DHT22 se aproximan a los valores obtenidos con el termómetro calibrado.

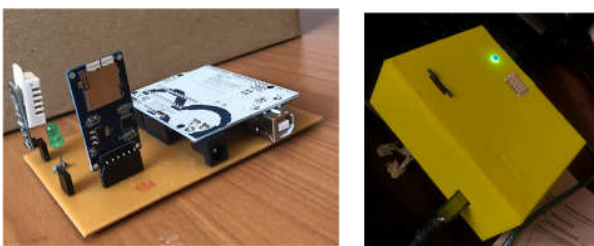


Figura 2. Dispositivo de medición de temperaturas JRMETER.

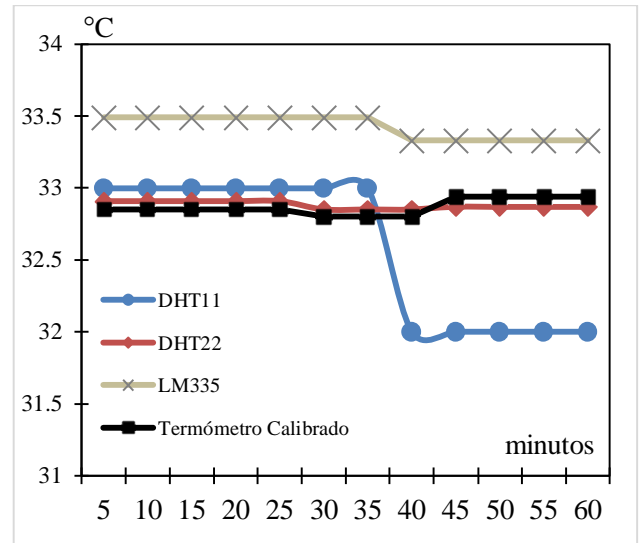


Figura 3. Comparación de los sensores

Para este estudio, se consideraron temperaturas promedio mensuales, ya que la temperatura no varía de manera significativa durante un mes, de acuerdo a los datos presentados por ETESA para los años 2018 y 2019 [7]. Esto permitió simplificar el análisis de datos, así como su representación gráfica. En la figura 4 se presentan los valores de temperatura exterior promedio, correspondiente a la temperatura ambiental de cada uno de los meses estudiados, tanto los registrados por el JRMETER, como los valores proporcionados por ETESA, en la Estación de Los Santos [7].

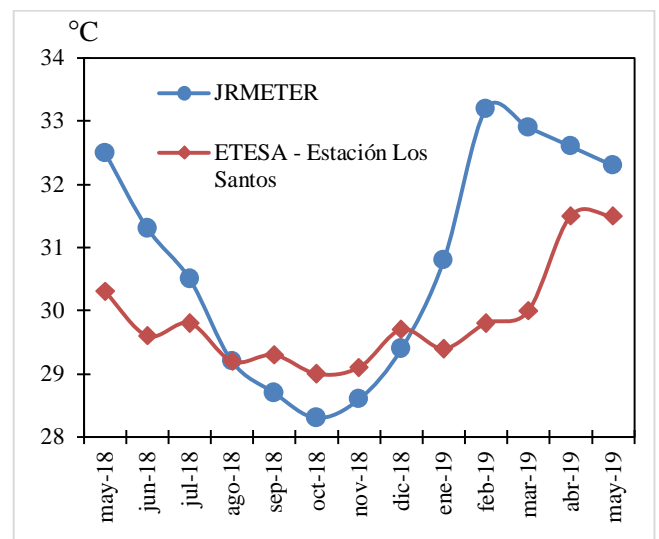


Figura 4. Temperatura exterior promedio mensual.

Por otra parte, se realizaron mediciones de temperaturas en el interior del recinto, considerando tres casos: sin aislamiento en las ventanas y aislando las mismas con materiales comerciales como el gypsum y el poliestireno expandido (ver figura 5). En la gráfica se presentan los valores promedios de las temperaturas interiores medidas a lo largo del año de prueba.

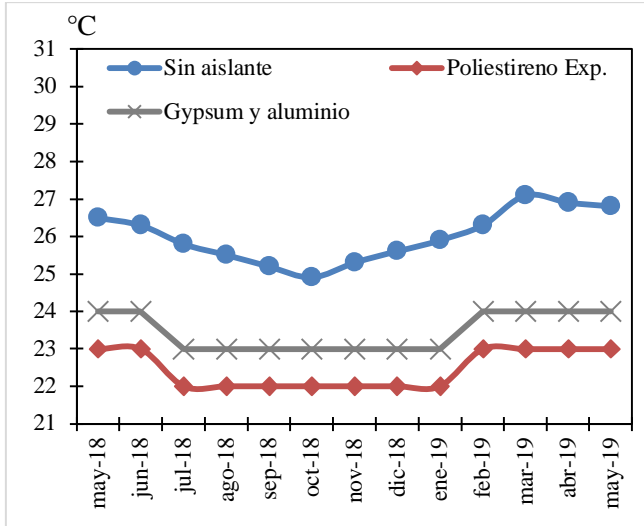


Figura 5. Temperaturas interiores promedio mensual.

2.2. Medición de consumo energético

El consumo eléctrico diario fue medido utilizando un analizador de calidad de energía AEMC PowerPad Modelo 3945-B [13].

Para las medidas sin aislante, se tienen intervalos de consumos de entre 14,995 y 16,650 Wh, para el poliestireno expandido, los intervalos de medición oscilan entre 11,550 y 12,578 Wh, y para el gypsum, los intervalos de medición oscilan entre 12,900 y 13,793 Wh. Como resultado se tiene que el poliestireno expandido es el material que presenta un menor consumo de energía, con respecto al resto de condiciones evaluadas al colocarlo como aislante en ventanas.

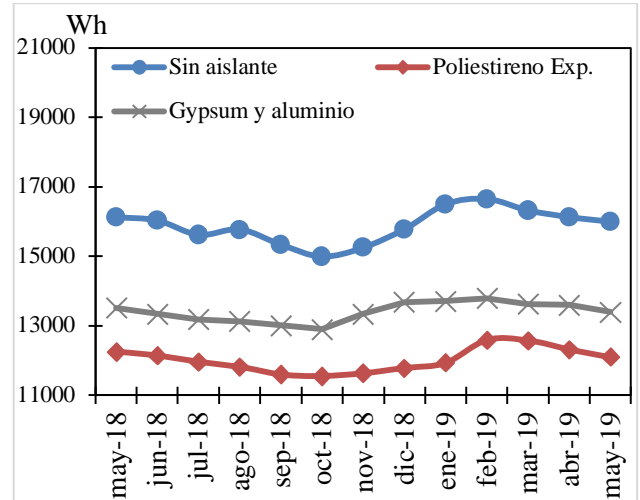


Figura 6. Consumo Eléctrico promedio mensual.

2.3. Medición de conductividad térmica

La medición de conductividad térmica se realizó en cinco materiales, dos de ellos comerciales (poliestireno expandido y gypsum con lámina de aluminio) y el resto, materiales base de fibras naturales y almidón de yuca (paja de arroz, bagazo de caña y estopa de coco). Para la medida de conductividad térmica se utilizó un prototipo de medición de conductividad térmica, basado en la norma ASTM-C177 [14] y en la ley de Fourier de conducción de calor unidimensional. La ley de Fourier incorpora características mecánicas del proceso de transferencia de calor en una propiedad física conocida como conductividad térmica (k), del gradiente de temperatura (dT/dx) y el área (A):

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Para muchos materiales la conductividad térmica se pueda aproximar el valor del coeficiente k con una función lineal de la temperatura sobre intervalo de temperatura limitados [5]. En la Tabla 1 se muestran los valores del coeficiente de conductividad térmica medidos para los materiales en estudio, así como dos valores de referencia obtenidos en la bibliografía para los materiales comerciales.

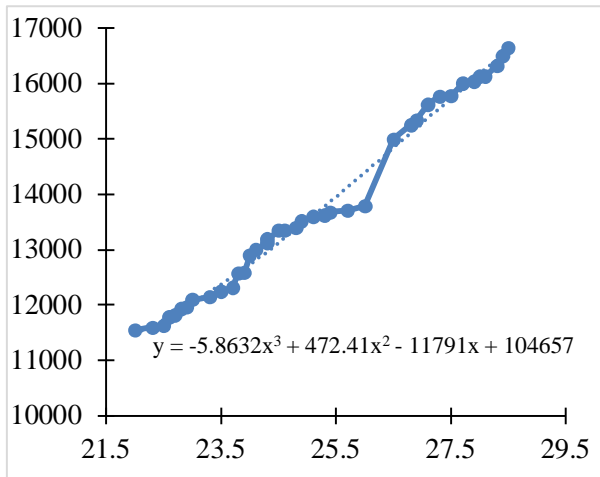
Tabla 1. Conductividad térmica medida

| Material | K promedio medido (W/m·K) | K bibliografía (W/m·K) [5] |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Poliestireno expandido | 0.033 | 0.034 |
| Gypsum y aluminio | 0.043 | 0.044 |
| Estopa de coco | 0.065 | Material nuevo |
| Bagazo de caña | 0.055 | Material nuevo |
| Paja de arroz | 0.050 | Material nuevo |

A partir del análisis de los resultados obtenidos, los materiales naturales estudiados demostraron una conductividad térmica baja, y se consideran como valores adecuados para aislar térmicamente. Los valores de conductividad térmica entran en el intervalo de aislamiento térmico que va desde 0.020 W/m·K hasta 0.085 W/m·K [5].

3. Predicción de Consumo Energético

A partir de los datos obtenidos de consumo y temperatura en el recinto estudiado, se procedió a hacer un gráfico de Consumo vs Temperatura, como se muestra en la figura 7. De la línea de tendencia, se obtuvo una relación de tipo polinómica de tercer grado y el valor del coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9892 (ecuación 2).

**Figura 7.** Gráfico de consumo (kWh) vs Temperatura (°C).

$$P = -5.8632(T_F)^3 + 472.41(T_F)^2 - 11791(T_F) + 104657 \quad (2)$$

Donde P representa la potencia en Wh y T_F la temperatura interior del recinto en °C. En la ecuación (3)

no es más que una variación de la ley de Fourier, despejada para el valor de T_F .

$$T_F = T_c - \frac{E\dot{Q}}{kA} \quad (3)$$

La variación de temperatura en 3 dimensiones espaciales al cuadrado en función del cambio de la temperatura con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

En forma abreviada el operador laplaciano para el sistema de coordenadas rectangular.

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Siendo ∇^2 es independiente del sistema de coordenadas, la forma anterior es útil si se desea trabajar en coordenadas cilíndricas y esféricas.

Para este estudio se consideró un caso con flujo de calor unidimensional y limitando la forma geométrica del estudio, en este caso una pared. Así mismo se consideró un material sin variación en su composición, estructura y espesor, con el objetivo de obtener una relación de predicción relativamente sencilla, con condiciones que permiten aproximar la situación de estudio a un problema real. El régimen en estudio fue el estacionario. No se consideraron los efectos de los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación.

4. Relación de Predicción: Interpretación

Una vez expresada la ecuación (2), que relacionó la temperatura, el consumo (potencia) y el coeficiente de conductividad térmica, esta debe ser capaz de satisfacer las necesidades y de predecir el consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales con potencial para aislar.

De la relación de predicción (2) se pudieron obtener valores para los siguientes materiales naturales, que son considerados como desechos agroindustriales y que a su vez fueron caracterizados térmicamente con el medidor de conductividad térmica creado.

Tabla 2. Predicción de consumo para materiales aislantes con datos de conductividad térmica medido.

| Mes | Paja de arroz (kWh) | Fibra de Coco (kWh) | Bagazo de caña (kWh) |
|--------|---------------------|---------------------|----------------------|
| may-18 | 13.54 | 13.59 | 13.56 |
| jun-18 | 13.38 | 13.42 | 13.39 |
| jul-18 | 13.22 | 13.26 | 13.23 |
| ago-18 | 13.15 | 13.3 | 13.17 |
| sep-18 | 13.03 | 13.07 | 13.04 |
| oct-18 | 12.93 | 12.97 | 12.94 |
| nov-18 | 13.38 | 13.42 | 13.39 |
| dic-18 | 13.71 | 13.76 | 13.72 |
| ene-19 | 13.74 | 13.78 | 13.75 |
| feb-19 | 13.82 | 13.87 | 13.84 |
| mar-19 | 13.65 | 13.70 | 13.67 |
| abr-19 | 13.63 | 13.67 | 13.64 |
| may-19 | 13.43 | 13.48 | 13.45 |

De acuerdo a los datos obtenidos, se puede observar que los tres materiales a base de fibras naturales presentan predicciones de consumo por debajo de los datos experimentales (ver figura 6). Por otra parte, las predicciones de consumo se encuentran dentro del intervalo de los valores obtenidos experimentalmente con el poliestireno expandido y el gypsum.

Los valores de consumo obtenidos por medio de la relación matemática con respecto a la predicción del consumo deben corroborarse con la medición experimental, tal y como se realizó con los materiales comerciales. Sin embargo, la relación obtenida permite analizar de forma preliminar el potencial de aislamiento de dichos materiales. Esto, a su vez, permite tomar decisiones a la hora de elegir los materiales potenciales antes de proceder con la experimentación, considerando que la toma de datos se realice durante al menos un año.

Además, tomando en cuenta los valores de predicción de consumo obtenidos para los diferentes materiales a base de fibras naturales, se puede plantear en un paso siguiente un estudio de las propiedades higroscópicas del material, considerando la capacidad de absorber la humedad del entorno, así como un estudio de la difusión de vapor del material. Esto implica profundizar en el proceso de fabricación de los nuevos materiales a base de fibra, considerando la pulverización del material, y, por otra parte, la disposición y orientación de las fibras, para lograr las mejores condiciones de construcción de este.

En este estudio se aplicó la ecuación de conducción de calor unidimensional. Para ajustar los datos de energía versus temperatura se debe realizar un estudio del gradiente de temperatura, en lugar de considerar la diferencia de temperatura que se asume en el caso ideal. Esto implica una modelización matemática que incluya los efectos del espesor real de la pared (bloque, repello y pintura).

A partir de los resultados obtenidos, se espera continuar con el presente estudio incluyendo los efectos de los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación.

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos ha sido posible plantear las siguientes conclusiones:

- Mediante las mediciones de conductividad térmica de los materiales naturales estudiados se comprobó su potencial de aislamiento. El que presentó menor conductividad térmica fue la paja de arroz con $0.050 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, seguido del bagazo de caña el cual presentó $0.055 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y por último la estopa de coco con $0.065 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, siendo la paja de arroz el mejor aislante de los materiales naturales estudiados.
- Es importante recalcar que, con estos resultados, se obtiene una referencia en cuanto a la implementación de materiales aislantes dentro de un recinto para la reducción en el consumo energético.
- El estudio de estos materiales naturales contribuye con los esfuerzos existentes en materia de cuidado del medio ambiente, considerando el aprovechamiento de residuos que normalmente son considerados como desecho, dándoles un valor agregado.
- Los datos arrojados en esta investigación dieron como resultado una relación de predicción de energía en función de la temperatura. Dicha relación contempla el efecto del comportamiento de la temperatura a lo largo del año y la energía requerida para bajar la temperatura. En otras palabras, el consumo energético requerido para acondicionar térmicamente el recinto.

6. Agradecimiento

Agradecemos al Ingeniero Secundino Villarreal, Ingeniero Roberto Cigarruista, al Ingeniero José Muñoz y al Lic. Carlos Murillo por su asistencia técnica y evaluación del trabajo realizado para el desarrollo de esta investigación.

7. Referencias

- [1]. G. B. Mundial, «Banco Mundial,» [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2014&locations=PA&start=1971&view=chart>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [2]. «Central America Data,» 7 Marzo 2018. [En línea]. Available: https://www.centralamericadata.com/es/article/home/Los_nmeros_de_la_energia_elctrica. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [3]. L. Prensa, «E&N,» 13 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.estrategiaynegocios.net/inicio/839794-330/panam%C3%A1-se-dispara-consumo-de-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [4]. «Index Mundi,» 1 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.indexmundi.com/map/?v=81000&r=xx&l=es>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [5]. Y. A. Cengel, Transferencia de Calor y Masa, Mc Graw Hill.
- [6]. D. Bozsaky, «Historical Development and Special Building Structures of In-earth Embedded Houses,» Acta Technica Jaurinensis, 2015.
- [7]. «ETESA Unimos Panamá con Energía,» [En línea]. Available: https://www.hidromet.com.pa/datos_diarios.php?estacion=9&mes=12&ano=2019%20.. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [8]. INEC, «Informe del Instituto Nacional de Estadística y Censo,» 20 Mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.contraloria.gob.pa/INEC/Publicaciones/Publicaciones.aspx?ID_SUBCATEGORIA=60&ID_PUBLICACION=481&ID_IDIOMA=1&ID_CATEGORIA=15. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [9]. N. Electronics. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [10]. J. R. Carvajal, «Sistema de análisis energético y de temperatura de las ventanas de un aula de clase con y sin aislamiento térmico,» RIC, vol. 4, n° 2, pp. 26-30, 2019.
- [11]. «Electrónicos Caldas,» [En línea]. Available: <https://www.electronicoscaldas.com/es/sensores-de-temperatura/194-sensor-de-temperatura-lm35.html>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [12]. «Picuino,» [En línea]. Available: <https://www.picuino.com/es/arduprog/sensor-dht11.html>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [13]. «AEMC PowerPad Modelo 3945-B, Manual de Instrucciones,» AEMC Instruments.
- [14]. S. T. M. f. S.-S. H. F. M. a. T. T. P. b. M. o. t. G.-H.-P. Apparatus, «ASTM,» [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/C177>.